

MÉTODOS SIMPLIFICADOS PARA ANÁLISE DA VULNERABILIDADE SÍSMICA DE CONSTRUÇÕES DE TERRA

Paulo B. Lourenço* e Daniel V. Oliveira

Universidade do Minho

Departamento de Engenharia Civil

Azurém, 4800-058 Guimarães, PORTUGAL

Tel.: +351 253 510 200; Fax: +351 253 510 217; E-mail: pbl@civil.uminho.pt

Tema 5: Comportamento e Resistência dos Edifícios

Palavras-chave: Vulnerabilidade sísmica, segurança, análise estrutural

Resumo

Este artigo apresenta uma contribuição para a verificação da segurança sísmica das construções em terra. Para este efeito, apresenta-se uma análise da segurança de quarenta e quatro igrejas antigas localizadas em diferentes zonas sísmicas da Europa (Portugal, Espanha e Itália) e organizadas de acordo com a perigosidade sísmica. São considerados três indicadores (índices) de segurança simplificados. Estes índices são comparados com valores limite propostos, permitindo detectar construções existentes com risco elevado, definir prioridades de intervenção no património construído e efectuar um pré-dimensionamento expedito. Adicionalmente, apresenta-se um caso de estudo em Mértola que permite validar os métodos aproximados, com recurso a métodos avançados de análise estrutural.

1. Introdução

As construções antigas são particularmente vulneráveis às acções dinâmicas, com especial ênfase para a acção sísmica. Portugal está particularmente em risco devido ao elevado número de monumentos e fogos em zonas com sismicidade elevada, e devido ao facto do último sismo de grande magnitude em Portugal continental ter ocorrido em 1755. Devido ao processo de envelhecimento e aos factores ambientais, muitas das construções de valor cultural são vulneráveis às acções dinâmicas, o que as pode conduzir ao colapso parcial ou total de forma inesperada. A elevada vulnerabilidade é essencialmente devida à ausência de ligações adequadas entre as várias partes (paredes, vigas de madeira nos pavimentos e telhados de madeira). Em geral, esta característica conduz a um colapso por rotação das paredes de contorno para o exterior, sob os efeitos de um sismo.

Em 2003, 380 catástrofes naturais e humanas causaram a perda de 60.000 vidas, sendo 43.000 causadas exclusivamente por sismos, e uma perda económica total de 70.000 milhões de euros. Em 26 de Dezembro de 2004, um sismo apenas com epicentro a Oeste da Costa de Sumatra e o tsunami que se gerou resultaram em mais de 280.000 mortos e mais de 1,1 milhão de desalojados em 10 países do Sudeste Asiático e África Oriental. Este evento excepcional causou uma perda económica estimada em mais de 20.000 milhões de euros.

A análise dos sismos recentes demonstra que o problema é generalizado e que as tipologias estruturais, bem como a distribuição e tipo de danos, são recorrentes. Neste artigo avalia-se a possibilidade de adoptar índices simples e baseados na informação geométrica para detectar construções existentes com risco elevado, definir prioridades de intervenção no património construído e efectuar um pré-dimensionamento expedito. Obviamente que o projecto de uma construção nova em terra, e a verificação de segurança ou o reforço de uma construção existente em terra, exigem estudos mais detalhados usando as recomendações e normas existentes noutros países.

2. Métodos Simplificados de Análise Sísmica

As estruturas em regiões sísmicas deverão ser projectadas e construídas de forma a que verifiquem os seguintes requisitos, com a probabilidade adequada (10^{-6}): (a) Ausência de colapso – A estrutura como um todo, incluindo elementos estruturais e não-estruturais, deverá resistir às acções de cálculo sem colapso total ou local, pelo que a integridade estrutural e uma capacidade resistente residual mínima deverão ser mantidas após o abalo sísmico; (b) Limitação dos danos – A estrutura como um todo, incluindo elementos estruturais e não-estruturais, deverá ser construída e projectada para resistir a acções sísmicas, com uma probabilidade de ocorrência superior à acção sísmica de projecto, sem que os custos associados aos danos e à limitação de utilização sejam desproporcionados em relação ao custo da própria estrutura.

A aplicação destes requisitos e da regulamentação existente a estruturas antigas não é óbvia. Habitualmente, o dimensionamento relativamente à acção dos sismos destas estruturas não foi considerado originalmente, enquanto que o dimensionamento para as acções que não de excepção foi normalmente considerado, nem que seja através de regras de construção tradicionais.

Apesar da diversidade, é habitualmente possível encontrar uma matriz comum nas construções antigas em zonas sísmicas, mais estrutural do que tecnológica. Esta consiste em alturas reduzidas dos edifícios (até 3 pisos), vãos moderados (máximo de quarto ou cinco metros) e uma elevada espessura das paredes (menos de 1/7 da altura), Giuffrè (1995). O presente artigo aborda o caso das igrejas europeias devido a dois factores: (a) À facilidade de aceder a informação sobre a geometria das mesmas; (b) Ao facto destas estruturas terem sido submetidas às acções de sismos no passado e, em alguns casos, terem sobrevivido devido a um ajuste iterativo à sismicidade do local.

Quarenta e quatro igrejas de Portugal, Espanha e Itália foram seleccionadas e analisadas considerando os seguintes três índices no plano: (a) Índice 1: Percentagem da área em planta; (b) Índice 2: Relação entre a área e o peso; (c) Índice 3: Corte basal. Obviamente que estes índices ignoram formalmente a esbelteza das paredes pelo que é necessário tomar este facto em consideração na análise.

O índice mais simples para avaliar a segurança de construções antigas é o Índice 1, fornecido pela percentagem de área de paredes em planta em cada direcção principal (transversal x e longitudinal y) e a área total em planta do edifício. De acordo com o Eurocódigo 8 (CEN, 2003b), as paredes apenas devem ser consideradas como resistentes se a sua espessura for superior a 0.35 m, e a relação entre a altura e a espessura for inferior a 9. O Eurocódigo 8 recomenda valores até 5-6%, para estruturas regulares com pavimentos rígidos. No caso de locais com sismicidade elevada, um valor mínimo de 10% é recomendado, Meli (1998). O Índice 2 fornece a relação entre a área em planta das paredes resistentes ao sismo e o peso total da construção. A altura (ou seja a massa) da construção é tomada em consideração, mas uma desvantagem apreciável é que o índice é dimensional. No caso de locais com sismicidade elevada, um valor mínimo de 2.5 m²/MN é recomendado, Lourenço e Roque (2004). Finalmente, o Índice 3 fornece a segurança com respeito à resistência ao corte da construção. Esta resistência ao corte depende da tensão vertical e da resistência ao corte da alvenaria, sendo possível admitir um valor de 0.05 MPa para a resistência ao corte e de 0.4 para a tangente do ângulo de atrito, ver Eurocódigo 6 (CEN 2003a). Para este género de construções, recomenda-se adoptar um valor unitário para o coeficiente de segurança, Lourenço e Roque (2004).

Os índices referidos são medidas distintas e não podem ser directamente comparados entre eles. Em particular, os índices 1 e 2 são independentes da sismicidade do local pelo que deverão aumentar com esta. Neste caso vai-se admitir que os valores limite acima referidos são válidos para um valor de PGA/g igual a 0.25 (PGA representa a

aceleração máxima de um solo rochoso e para um período de retorno de 475 anos, enquanto que g representa a aceleração da gravidade) e assumindo a sua variação linear com PGA/g , tal como ilustrado na Figura 1. O Índice 3 considera a sismicidade do local pelo que deverá ser constante.

3. Investigação realizada em quarenta e quatro monumentos europeus

A investigação apresentada neste artigo inclui a aplicação dos métodos simplificados a uma amostra de 44 monumentos (19 portugueses, 15 espanhóis e 10 italianos), seleccionados de acordo com a sismicidade e a informação disponível. Admitiu-se que os materiais eram semelhantes, com um peso volúmico de 20 kN/m^3 e um peso dos telhados igual a 2.0 kN/m^2 . Os valores calculados estão detalhados em Universidade do Minho (2005), apresentando-se os índices para a direcção transversal na Figura 2, que usualmente será a direcção crítica.

Os resultados indicam claramente que não existe uma relação directa entre os índices simplificados e a sismicidade, o que sugere uma das seguintes hipóteses: (a) os construtores da antiguidade de monumentos não tinham uma preocupação clara com a acção sísmica (o que poderá fazer sentido porque os construtores dos grandes monumentos viajavam pela Europa, sendo por exemplo possível encontrar mestres espanhóis e franceses em Portugal, descontextualizados da perigosidade sísmica); (b) os métodos simplificados não são adequados para avaliar a vulnerabilidade sísmica. Obviamente que os autores são de opinião que a primeira hipótese é a mais provável. Os Índices 1 e 2 não apresentam uma tendência clara de aumento com a sismicidade, pelo que o Índice 3 apresenta uma redução clara de segurança com o aumento da sismicidade.

Para o total da amostra e para os valores limite adoptados, 23% das igrejas violam o Índice 1 na direcção x e 7% das igrejas violam o Índice 1 da direcção y . Para o Índice 2, os valores obtidos são 39% e 30%, respectivamente para as direcções x e y (este índice é essencialmente violado pelos monumentos espanhóis). Finalmente, para o Índice 3, os valores obtidos são 41% e 32%, respectivamente para as direcções x e y (este índice é essencialmente violado pelos monumentos italianos). A diferença obtida entre os índices e entre os países demonstra claramente que apenas um índice poderá não ser adequado às tipologias das construções observadas nos diferentes países. No presente trabalho, e como uma ferramenta de avaliação rápida e preliminar, sugere-se considerar como prioritários para análise posterior os monumentos que violem o Índice 3 e simultaneamente um dos outros dois índices, pelo menos numa direcção. Encontram-se neste caso, dezanove monumentos, sendo os casos portugueses os seguintes: (a) Antigo Mosteiro de Jesus, Setúbal; (b) Igreja de Santa Maria de Belém, Lisboa.

4. Descrição de um Caso de Estudo: Casa do Lanternim em Mértola

A Casa do Lanternim localiza-se no centro da Povoação de Mértola, pretendo-se recuperar, remodelar e ampliar o imóvel tendo em vista o estabelecimento de um Centro Polivalente. Trata-se de uma edificação de três pisos ($r/c+2$), com cobertura de apenas uma água em telha de canudo, ver Figura 3. Atendendo ao mau estado do imóvel, foi requerido à Universidade do Minho a realização de um estudo sobre a segurança do imóvel relativamente à acção sísmica.

A estrutura é essencialmente constituída por paredes de alvenaria e pavimentos em madeira, ainda que exista uma abóbada de berço ao nível do rés-do-chão. Supõe-se que o edifício tenha recebido reparações e remodelações diversas uma vez que a constituição das paredes de alvenaria é altamente não-homogénea. De facto, verifica-se a presença de paredes de alvenaria com pedra irregular, com tijolo maciço e com pedra, bem como paredes de taipa.

Trata-se de um edifício de médio porte, atendendo às dimensões em planta ($23 \times 15 \text{ m}^2$). Do ponto de vista sísmico, salientam-se os seguintes aspectos: (a) O edifício localiza-se na zona nacional de maior sismicidade (zona A); (b) Supõe-se que o edifício não tenha sido submetido a nenhum abalo sísmico significativo, que de alguma forma pudesse demonstrar a sua segurança relativamente a esta acção; (c) O edifício deve ser classificado como irregular em planta uma vez que a rigidez dos pavimentos não é suficiente para permitir o funcionamento das plantas como diafragmas rígidos; (d) Em altura, o edifício possui elevada assimetria pelo que também deverá ser considerado como irregular em altura; (e) O terreno de fundação é de boa qualidade (formação rochosa alterada e fracturada), a que se sobrepõe aterros heterogéneos muito descomprimidos e sem capacidade de suporte; (f) Verifica-se a existência de um aterro muito significativo da fachada posterior do edifício com 3.2 a 5.7 m de envergadura, pelo que deverá ser considerada a possibilidade de algum escorregamento da encosta e do aumento de acção sísmica provocado pela mobilização do aterro descomprimido; (g) O material que constitui as paredes é de fraca qualidade; (h) Verifica-se a existência de duas divisões com vãos elevados (cerca de 10 m) não contraventados. Informações adicionais e recomendações para reforço podem ser encontradas em Lourenço e Vasconcelos (2001).

5. Análise Sísmica

A área total da construção é igual a 256.2 m^2 , enquanto que a área das paredes estruturais consideradas é igual a 58.2 m^2 , sendo 14.3 m^2 na direcção transversal x e 43.9 m^2 na direcção longitudinal y. Desta forma, o Índice 1, ou a percentagem da área total em planta, é de 5.6% na direcção x e 17.1% na direcção y.

Para o Índice 2 e 3, admitiram-se as seguintes hipóteses: (a) Altura média da construção igual a 9.3 m; (b) Peso específico médio das paredes estruturais igual a 20 kN/m^3 ; (c) Peso da cobertura igual a 1.5 kN/m^2 ; (d) Peso dos pisos em madeira igual a 1.0 kN/m^2 (inclui divisórias); Valor quase permanente da sobrecarga igual a $0.2 \times 2.0 = 0.8 \text{ kN/m}^2$. O peso total da estrutura (sem fundações) resulta igual a $58.2 \times 9.3 \times 20 + 256.2 \times (1.5 + 2 \times 1.0 + 2 \times 0.8) = 12.1 \text{ MN}$. Desta forma, o Índice 2, ou a relação entre a área efectiva e o peso, é de $14.3 / 12.1 = 1.2 \text{ m}^2/\text{MN}$ na direcção x e $43.9 / 12.1 = 3.6 \text{ m}^2/\text{MN}$ na direcção y. O Índice 3, ou a relação entre o corte basal aplicado e resistente, é igual a 0.72 na direcção x e a 2.2 na direcção y.

A análise simplificada demonstra que a construção parece possuir resistência desadequada para a acção sísmica na direcção transversal. A necessidade de efectuar uma análise mais aprofundada da estrutura parece evidente, em função destes resultados. Para esse efeito, foi efectuada uma análise com elementos finitos de casca, admitindo uma resistência à tracção nula dos materiais. Foi ainda efectuada uma análise local de determinadas zonas da estrutura (chaminé e lanternim), tendo em vista quantificar a segurança destes elementos específicos.

Para a análise global da estrutura consideraram-se as paredes que, previsivelmente, funcionarão como paredes estruturais no caso da acção sísmica. A chaminé e o lanternim não foram incluídos uma vez que os danos locais nestes elementos poderiam impedir a análise global da estrutura até um factor de carga julgado adequado. Os pavimentos / cobertura de madeira não foram incluídos no modelo, atendendo à previsível deficiente ligação entre a estrutura de alvenaria e as estruturas de madeira, bem como devido às dificuldades de quantificação da rigidez destes elementos.

As propriedades mecânicas que se adoptaram para o material foram: módulo de elasticidade E igual a 1 GPa e um coeficiente de Poisson ν igual a 0.2. Como acções (de carácter permanente) considerou-se o peso próprio da estrutura e do lanternim. A acção dos sismos foi simulada por um conjunto de forças horizontais proporcionais às massas, de acordo com a regulamentação nacional.

Para as acções verticais, obtém-se tensões de compressão máximas reduzidas, com um máximo de 0.4 MPa e um valor corrente ao nível do arranque das paredes igual a 0.2 MPa, assumindo a deformação da estrutura valores pouco significativos. Os resultados da análise para a acção base sismo nas duas direcções principais encontram-se ilustrados na Figura 4, em termos de fendas e deformada. No caso da acção sísmica transversal, a estrutura atinge a rotura ligeiramente antes do valor regulamentar, com fendilhação significativa (1.3 cm na parede de contraventamento francamente danificada). As tensões de compressão máximas são reduzidas, com máximos localizado nos cantos das aberturas até um valor de 1.0 MPa e um valor máximo ao nível do arranque das paredes igual a 0.6 MPa. A deformação da estrutura assume um valor máximo de cerca de 2.5 cm. No caso da acção sísmica longitudinal, atinge-se o valor regulamentar com fendilhação insignificante (da ordem do mm), que ocorre essencialmente nas paredes de contraventamento próximas das fachadas exteriores. As tensões de compressão máximas são reduzidas, com máximos localizados nos cantos das aberturas e arco até um valor de 1.1 MPa e um valor máximo ao nível do arranque das paredes igual a 0.6 MPa. Desta forma, a análise detalhada permitiu comprovar a insuficiente resistência sísmica sugerida pela análise simplificada.

6. Conclusões

Na história existem diversas ocorrências de sismos com efeitos devastadores. Dada a sua natureza, é bastante provável que sismos de grande potencial destrutivo ocorram no futuro em Portugal. Assim, é da responsabilidade de todos os intervenientes (autoridades, investigadores, projectistas e empresas) envidar esforços no sentido de minorar perdas humanas e danos físicos nas construções. Os conhecimentos adquiridos na última década, não somente devidos à investigação, mas também os resultantes da análise dos efeitos causados pelos grandes sismos que ocorreram recentemente, permitem reduzir a vulnerabilidade sísmica e, simultaneamente, definir soluções técnicas mais arrojadas e mais económicas. Relativamente ao património construído, é conhecida a elevada vulnerabilidade das construções na zona de Lisboa e Vale do Tejo, Algarve, Alentejo e Açores, sendo o sismo dos Açores de 8 de Julho de 1998 um exemplo recente e dramático.

As construções em terra são particularmente vulneráveis devido à fragilidade do material, sendo de evitar construções novas na ausência de elementos de reforço adequados e de uma análise estrutural adequada. Neste artigo, apresenta-se uma investigação sobre a possibilidade de utilizar métodos simplificados de análise com o objectivo triplo de detectar construções existentes com risco elevado, definir prioridades de intervenção no património construído e efectuar um pré-dimensionamento expedito. Os resultados demonstram que os índices adoptados possuem variação significativa na Europa em termos de importância e que os construtores da antiguidade da construção monumental parecem não ter sido significativamente influenciados pelas condições de sismicidade local. O artigo apresenta ainda uma comparação entre os métodos simplificados e uma análise estrutural avançada, com recurso à simulação do comportamento não-linear. Neste caso, verifica-se que os resultados obtidos com a análise estrutural avançada confirmam os resultados obtidos com os métodos simplificados de análise.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio parcial do European-Indian Economic Cross Cultural Programme, no âmbito do projecto ALA/95/23/2003/077-122, "Improving the Seismic Resistance of Cultural Heritage Buildings".

Bibliografia

- CEN (2003a), *Eurocode 6: Design of masonry structures*, prEN 1996-1, Bruxelas, Bélgica
- CEN (2003b): *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance*, prEN 1998-1, Bruxelas, Bélgica.
- GIUFFRÉ, Antonino (1995): "Seismic damage in historic town centers and attenuation criteria", *Annali di Geofisica*, 38(5-6), 837-843.
- LOURENÇO, P.B.; VASCONCELOS, G. (2001) *Avaliação da segurança sísmica da Casa do Lanternim (Mértola)*, Relatório CON-01-DEC/E-1, Universidade do Minho.
- LOURENÇO, Paulo B.; ROQUE, João (2004): "Simplified indexes for the seismic vulnerability of ancient masonry buildings", *Construction and Building Materials* (aceite para publicação).
- MELI, Roberto (1998): *Engenharia estrutural de construções históricas* (em Espanhol), Cidade do México, Fundación ICA.
- UNIVERSIDADE DO MINHO (2005): *Overview of seismic risk for large span buildings heritage*, Relatório elaborado no âmbito do contrato ALA/95/23/2003/077-122, "Improving the Seismic Resistance of Cultural Heritage Buildings", Guimarães, Portugal.

Figuras

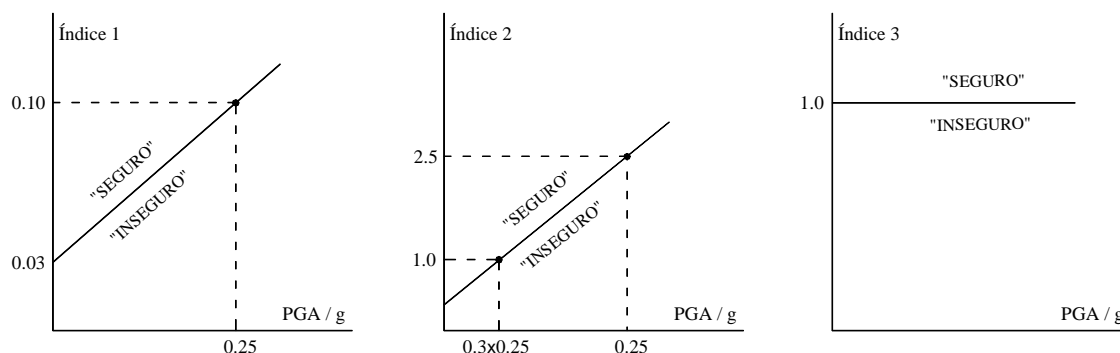


Fig.1 – Valores limite assumidos para os índices 1, 2 e 3 em função de PGA/g.

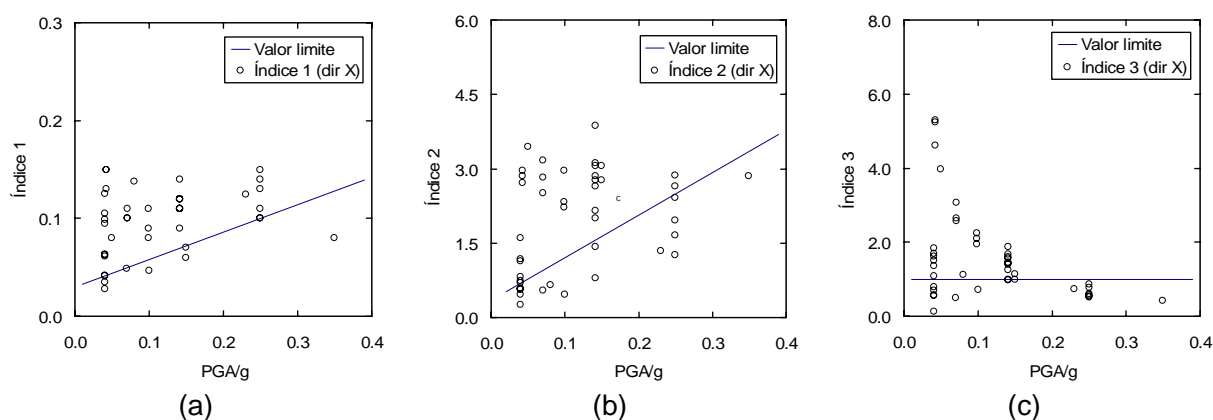
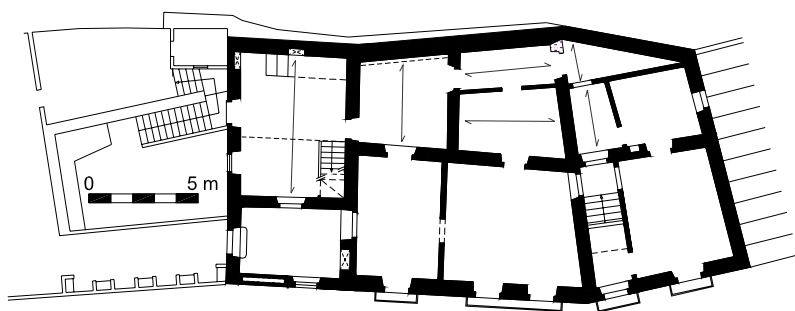


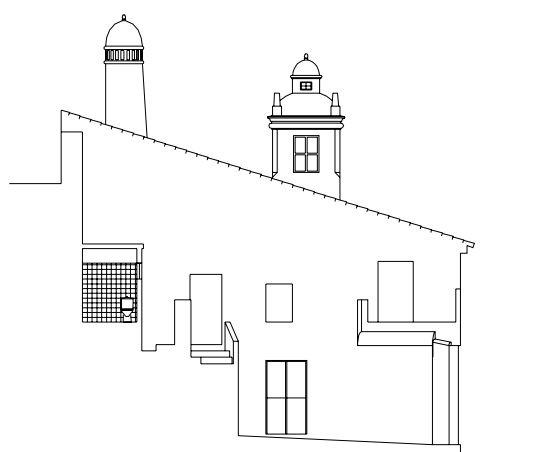
Fig.2 – Relação entre os índices na direcção transversal e PGA/g, para a amostra completa: (a) Índice 1, (b) Índice 2, (c) Índice 3.



(a)

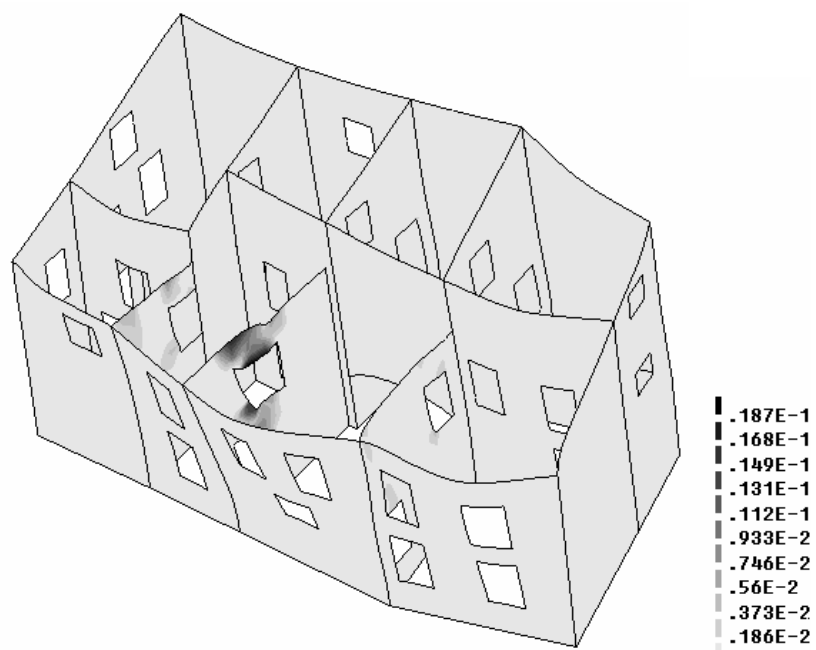


(b)

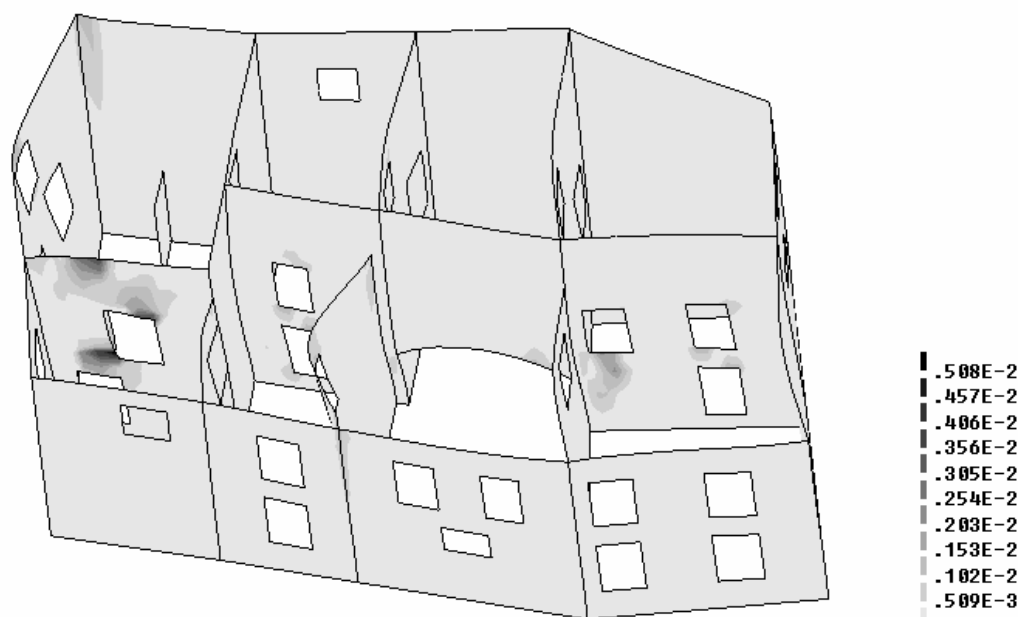


(c)

Fig.3 - Aspectos do imóvel: (a) planta típica; (b) alçado principal; (c) alçado esquerdo.



(a)



(b)

Fig.4 – Fendilhação e deformação obtida na análise estrutural para a acção sísmica: (a) direcção transversal e (b) direcção longitudinal. Os valores indicados representam as extensões principais de tracção.